

УДК 681.5 : 622.279

М.Г.СУХАРЕВ, д-р техн. наук, В.Ю.ИТКИН, канд. техн. наук, И.А.КОРНИЛОВ  
РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г.Москва (Российская Федерация)

Д.В.КАНЕВ

ОАО "Газпром автоматизация", г.Москва (Российская Федерация)

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ЗАМЕРАМ РАСХОДОВ ГАЗА НА ГАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ**

Модель учитывает технологическую структуру замерного узла, точность измерительной аппаратуры, результаты калибровки, динамику изменения во времени и взаимосвязь показаний всех измерительных средств. Модель построена на методах математической статистики. Разработана программа с удобным для пользователя сервисом.

Модель враховує технологічну структуру замірного вузла, точність вимірювальної апаратури, результати калібрування, динаміку зміни в часі і взаємозв'язок показань всіх вимірювальних засобів. Модель побудована на методах математичної статистики. Розроблено програму зі зручним для користувача сервісом.

The Model includes technological design of the metering unit, precision of instrumentation, results of calibration, time-dependent dynamics, and interrelation of all instrumentation measurements. The model is based on methods of mathematical statistics. Application software has been developed which has an easy to use user interface.

*Ключевые слова:* газоизмерительная станция, ультразвуковые счетчики газа, достоверность измерений, погрешность измерений.

Точность расходомеров на ГИС. Измерения расхода газа газоизмерительной станции (ГИС) на компрессорной станции (КС) Портовая предназначены для расчетов с зарубежными потребителями Северо-Европейского газопровода. Этот фактор определяет повышенные требования к точности и достоверности измерительной системы, поэтому счетчики газа многократно дублированы. Предлагается модель обработки измерений основана на оценке систематической и случайной погрешностей и отсева отдельных выбросов.

Расходомеры расположены на 8-ми параллельных трубопроводах ГИС. В зависимости от режима эксплуатации часть трубопроводов может находиться в резерве. Каждый газопровод снабжен двумя расходомерами различных фирм – SICK и RMG, откалиброванными на испытательном стенде pigsar<sup>1</sup>. В результате калибровки систематическая погрешность сводится к пренебрежимо малой величине. Для каждого типа расходомеров зависимость абсолютной величины случайной погрешности  $\Delta q$  от расхода  $q$  приведена на рис.1.

---

<sup>1</sup> pigsar<sup>TM</sup>. Испытательный стенд для счетчиков газа высокого давления и национальный эталон Германии для природного газа высокого давления. E/On Ruhrgas AG. Dorsten, Германия, 2007. – 11 с.

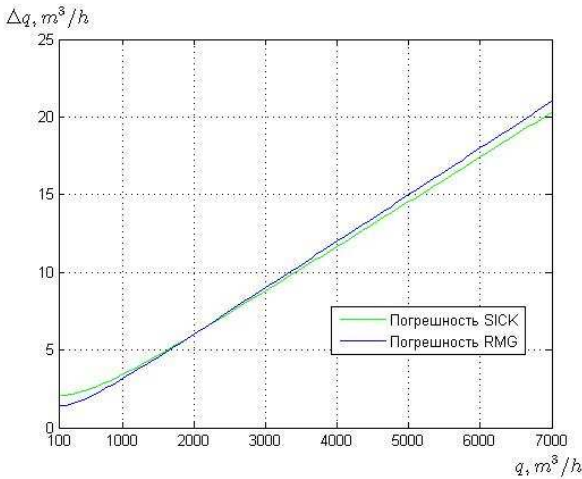


Рис.1 – Зависимость абсолютных погрешностей от расхода

При расходах, больших 2000 м³/ч, относительная погрешность расходомеров не превышает 0,3%. Измерения расхода газа производятся с высокой частотой – до 10 замеров в секунду, – поэтому на основе статистики замеров можно оценить величину погрешности. Если она существенно превышает погрешность, оцененную по результатам калибровки, значит, расходомер неисправен.

*Систематическая и случайная погрешности.* Представим показание расходомера  $q^*$  как сумму истинного расхода  $q$ , систематической погрешности  $g(q)$  и случайной погрешности  $\epsilon(q)$ :

$$q^* = q + g(q) + \epsilon(q). \quad (1)$$

Здесь и далее звездочкой обозначаются приборные замеры.

Рассмотрим выборку  $n$  последних замеров  $q^{*j}$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Построим модель, выдвинув следующие предположения:

1. Случайная погрешность в среднем равна нулю,  $\mathbf{M}\epsilon = 0$ .
2. Зависимость дисперсии случайной погрешности от расхода в течение периода измерения  $j = \overline{1, n}$  можно приближать квадратичной моделью  $S^2(q) = aq^2$ .
3. Зависимость систематической погрешности от расхода в течение периода измерения  $j = \overline{1, n}$  можно приближать линейной моделью

$$g(q) = a_0 + a_1 q.$$

4. Относительный расход  $i$ -го расходомера  $k_i = q_i(t)/Q(t)$ ,  $i = \overline{1, 2m}$  не зависит от времени. Здесь  $Q(t)$  – суммарный расход по ГИС,  $m$  – количество подключенных трубопроводов.

5. При калибровке прибора систематическая погрешность была сведена к систематической погрешности стенда. Преобладающей является случайная погрешность,  $g(q) \ll S(q)$ .

6. Измерения производятся расходомерами одновременно.

7. Вероятность одновременного отказа более 25% расходомеров пренебрежимо мала.

*Оценка систематической погрешности.* После пуска ГИС в эксплуатацию необходимо собрать статистические данные о работе исправных расходомеров в реальных условиях. Эту выборку назовем *контрольной*. При дальнейшей эксплуатации ГИС периодически собираются статистические данные о текущей работе. Эту выборку назовем *проверяемой*. Она идентифицирует отказы расходомеров за данный период измерений.

Одновременные замеры расхода на нескольких приборах позволяют оценить систематическую погрешность. Считая относительный расход постоянным, оценим его величину для каждого расходомера, используя контрольную выборку. Систематическую погрешность в этом случае можно считать нулевой, а разброс величин относительного расхода от замера к замеру объяснять случайной погрешностью измерений. Тогда относительный расход  $i$ -го расходомера естественно оценивать средним значением

$$\bar{k}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{q_i^{*j}}{Q^{*j}}, \quad i = \overline{1, 2m}. \quad (2)$$

Теперь рассмотрим проверяемые выборки показаний всех расходомеров  $q_i^*$ ,  $i = \overline{1, 2m}$ . Имея предварительно оцененные по контрольным данным относительные расходы  $\bar{k}_i$ , найдем оценки суммарного расхода по показаниям одного расходомера

$$Q_i = q_i^* / \bar{k}_i. \quad (3)$$

По  $n$  последним замерам для выборок  $Q_i^j$  вычислим выборочные средние  $\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_i^j$ . Эти величины не будут оценками математиче-

ского ожидания величин  $Q_i$ , поскольку они зависят от времени. Но величины  $\mu_i$  дают представление о соотношении между погрешностями разных приборов. Расходомер с номером  $b$ , для которого  $|\mu_b - \tilde{\mu}_{0,5}| = \min_{i=1,2m} |\mu_i - \tilde{\mu}_{0,5}|$ , где  $\tilde{\mu}_{0,5}$  – медиана выборки  $\mu_i$ , т.е. «самый средний», имеет наименьшую систематическую погрешность, которую в силу сделанных предположений можно считать нулевой. При этом разброс величин относительного расхода от замера к замеру объясняется случайной погрешностью измерений. Тогда относительный расход  $i$ -го расходомера естественно оценивать средним значением  $\bar{k}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{q_i^{*j}}{Q^{*j}}, i = 1, 2m$ .

Чтобы оценить систематическую погрешность, для  $i$ -го расходомера вычислим разности

$$\Delta_{ib} = Q_i - Q_b = \frac{g_i(q_i^*)}{k_i} + \frac{\varepsilon_i}{k_i} + \frac{\varepsilon_b}{k_b}. \quad (4)$$

Для определения средней систематической погрешности воспользуемся линейной моделью, коэффициенты которой оценим с помощью метода наименьших квадратов [1],

$$M\Delta_{ib} = \frac{g_i(q)}{k_i} = a_{i0} + a_{i1}q. \quad (5)$$

Если систематическая погрешность отсутствует, то коэффициенты  $a_{i0}$ ,  $a_{i1}$  незначимы. Проверим эту гипотезу по критерию Фишера, статистика которого имеет вид:

$$F = \frac{(S_0^2 - S^2)/2}{S^2/(n-2)} \in F_{2,n-2}, \quad (6)$$

где  $S_0^2 = \sum_{j=1}^n (\Delta_{ib}^j)^2$  – сумма квадратов остатков модели с нулевым сред-

ним,  $S^2$  – сумма квадратов остатков модели, индексы в обозначении  $F_{2,n-2}$  показывают число степеней свободы распределения Фишера.

Сравнивая значимость

$$p = 1 - F_{2,n-2}(F) \quad (7)$$

с заданным уровнем  $\alpha$ , принимаем решение о значимости или незначимости модели (5). Здесь  $F_{2,n-2}(\cdot)$  – функция распределения Фишера с числами степеней свободы 2 и  $n-2$ .

Если зависимость (5) значима, то выявленная систематическая погрешность относится к проверяемому расходомеру, так как расходомер с номером  $b$  в силу сделанных предположений систематической погрешности не имеет.

*Оценка случайной погрешности и отсеив выбросов.* Рассмотрим ряд последовательных измерений  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  некоторого параметра  $x$ , изменяемого во времени. Параметром может быть расход, давление, температура. Измеренные значения параметра разложим на детерминированную  $x(t)$  и случайную  $\varepsilon$  составляющие:

$$x^*(t) = x(t) + \varepsilon. \quad (8)$$

Случайная составляющая  $\varepsilon$  – это погрешность измерительного прибора, в среднем равная нулю ( $M\varepsilon = 0$ ), а дисперсия погрешности пропорциональна квадрату измеряемой величины в силу предположения (6),

$$M\varepsilon^2 = S^2(x) = ax^2(t). \quad (9)$$

Закон изменения параметра от времени неизвестен, поэтому определяем детерминированную составляющую путем сглаживания по методу скользящего среднего [2, 3].

Применим линейное сглаживание в два этапа: 1) робастное сглаживание исходного ряда (игнорируются явные выбросы); 2) обычное сглаживание ряда, полученного на 1-м этапе.

Ширина окна сглаживания определяется в зависимости от степени гладкости. Показателем гладкости является количество поворотных точек, т.е. таких  $x_j^*$ , для которых выполняется одно из условий:

$$x_j^* > x_{j-1}^*, x_j^* > x_{j+1}^* \text{ или } x_j^* < x_{j-1}^*, x_j^* < x_{j+1}^*.$$

На первом шаге задается начальная ширина окна  $w=3$ . Затем она увеличивается и вычисляется количество поворотных точек. Если количество поворотных точек на очередном шаге не уменьшилось или уменьшилось лишь на 1, то считается, что достигнута необходимая степень гладкости. Полученный ряд  $\hat{x}_j$  будет расчетным значением параметра  $x$ , т.е. оценкой детерминированной составляющей.

По остаткам  $\hat{\varepsilon} = x^* - \hat{x}$  оценивается дисперсия погрешности, т.е.

определяется оценка параметра  $a$  в модели по методу наименьших квадратов. Тогда погрешность измерений, пользуясь «правилом 3 сигма», можно оценить как  $\Delta x_j = 3S(\hat{x}_j)$ . Наблюдения  $x_i^*$ , не попавшие в доверительный интервал  $[\hat{x}_j - \Delta x_j, \hat{x}_j + \Delta x_j]$ , будем считать *выбросами*. Ситуация иллюстрируется рис.2, в примере использованы реальные замеры расхода газа.

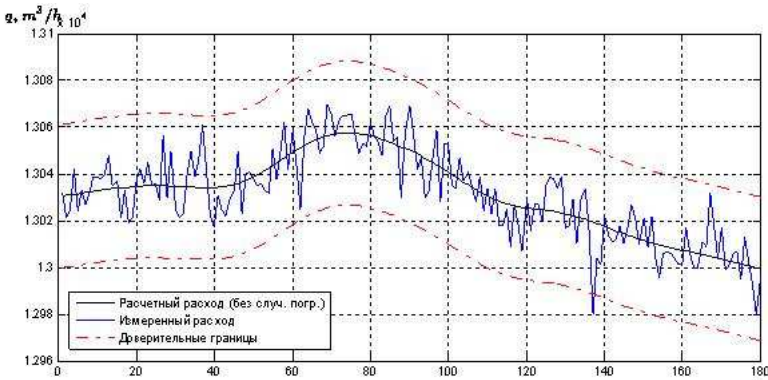


Рис.2 – Пример сглаживания показаний расходомера

Сравним фактическую погрешность с теоретической. Теоретической погрешностью может быть как погрешность по результатам калибровки, так и погрешность по классу точности, а также погрешность контрольной выборки. Если фактическая погрешность значительно превышает теоретическую, расходомер следует считать неисправным.

*Программа.* Представленная методика реализована программно. Основное окно программы состоит из двух частей: графическое окно со схемой ГИС и окно параметров выделенного расходомера. Количество расходомеров, их серийные номера и названия определяются исходя из данных контрольного файла.

Неисправные расходомеры отмечаются цветом в зависимости от критерия исправности (рис.3). Критерий исправности – это вероятность того, что у исправного расходомера погрешность достигает значения, оцененного по проверяемой выборке. Если эта вероятность меньше уровня значимости  $\alpha$  (по умолчанию  $\alpha=5\%$ , задается в меню «Настройки» / «Задать данные»), то расходомер считается неисправным.

Исправность расходомера определяется также и долей выбросов. Если эта доля превышает уровень значимости  $\alpha$ , расходомер считается неисправным.

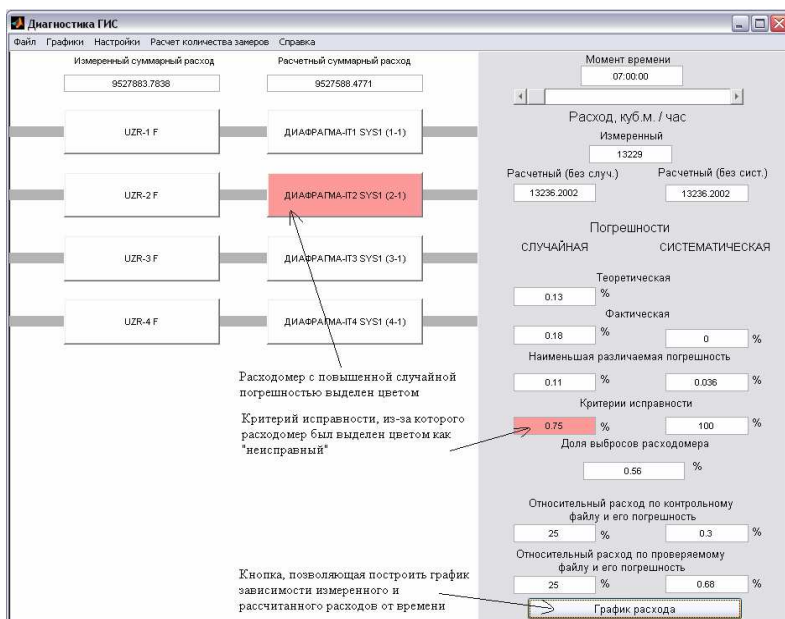


Рис.3 – Основное окно программы

Руководство по установке на компьютер и работе с программой пользователь может получить, вызвав справку в меню «Справка».

### Выводы

1. Разработана модель обработки замеров на ГИС КС Портовая. Модель учитывает:

- структуру замерного узла (8 трубопроводов с двумя расходомерами на каждом трубопроводе);

- точность измерительной аппаратуры и результаты калибровки;

- динамику изменения во времени показаний всех приборов.

Модель базируется на методах математической статистики и теории ошибок. Модель разработана впервые и не имеет аналогов.

2. Модель предназначена для решения следующих задач:

- отсеивание недостоверных показаний расходомеров; идентификация отказов измерительной аппаратуры;

- оценка расхода газа по совокупности показаний всех расходомеров;

- определение погрешности оценки суммарного расхода газа.

1.Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 899 с.

2.Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.

3.Сухарев М.Г. Методы прогнозирования. – М.: МАКС Пресс, 2010. – 176 с.

*Получено 04.11.2011*

УДК 532.542

Д.В.БОЙКОВ

*ООО «ТИРР», г.Красноярск (Российская Федерация)*

А.А.ДЕКТЕРЕВ

*Институт теплофизики СО РАН, г.Новосибирск (Российская Федерация)*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В СЕТЯХ**

Представлена модель, описывающая потокораспределение многокомпонентной неизоэтермической смеси в системах трубопроводов. В модели учитывается тепломассообмен с окружающей средой и химическое реагирование. Приведен пример использования модели для моделирования процессов сжигания и удаления продуктов сгорания в системе газоходов.

Подано модель, що описує потокорозподіл багатоконпонентної неізоэтермічної суміші в системах трубопроводів і враховує тепломасообмін з навколишнім середовищем та хімічне реагування. Наведено приклад використання моделі для моделювання процесів спалювання та видалення продуктів згорання в системі газоходів.

This Article present model flux-distribution a multicomponent, not isothermal mixes in systems of pipelines. Model it is allowed heat mass exchange with an environment and chemical reaction. Cite an example use of model for modelling processes of burning and removal of products of combustion is resulted.

*Ключевые слова:* трубопроводные сети, моделирование потокораспределения.

Для решения задач потокораспределения, возникающих при расчете трубопроводных сетей, вентиляции зданий и шахт, систем охлаждения двигателей и др., применяются модели гидравлических цепей, в основу которых положены законы Кирхгофа [1, 2]. Гидравлическая цепь состоит из узлов и связывающих их ветвей. Узлы это объемы, в которых соблюдаются законы сохранения массы и энергии, выраженные в форме интегральных уравнений баланса расходов и тепловой энергии. Ветви моделируют различные конструкции газоходного тракта. Каждая ветвь цепи характеризуется своим интегральным законом, связывающим перепад давления на данной ветви с расходом газа в ней.

Адаптация модели гидравлической цепи к задачам потокораспределения газовых смесей в трубопроводах требует соответствующей модификации. Изменение концентраций компонент смеси и температуры в результате смешения потоков, химического реагирования и тепломассо-